Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics, 34, 2022. (35-52)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

Investigating the Effect of Phase Change Materials on Energy Consumption in Lightweight Prefabricated Relief Buildings

Research Article

Ali Amiri-Jaghargh[1], Amir Yarinezhad[2]

DOI: 10.22067/jacsm.2022.78503.1136

1. Introduction

Energy saving in the building sector has received wide attention due to its share of 40% in global energy consumption. Therefore, the use of prefabricated buildings has been expanded. The lightness of these buildings, along with advantages such as easy movement, leads to problems such as high thermal conductivity and low thermal inertia of the building shell. Phase Change Materials (PCM) are a suitable option for solving these problems due to their high latent heat capacity.

2. Method

To investigate the effects of using phase change materials in prefabricated road relief buildings, a sample relief unit was considered in Kermanshah city, Iran, and its annual energy consumption was simulated with DesignBuilder software. The case study is a prefabricated building with an area of 18 square meters and a height of 2.5 meters (Figure 1). Natural ventilation and air infiltration are ignored and the inside air temperature is adjusted by a split conditioner in the range of 18 to 24 degrees Celsius.

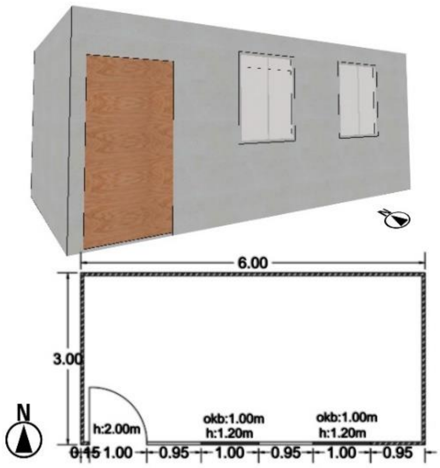


Figure 1. The view and the plan of the building

3. Validation

To validate the numerical process, a building similar to the one studied by Wang et al. [23] was simulated and their temperature response was compared. The mean absolute error of the obtained results with the results of Wang et al. is 3.6 °C, which shows a good agreement. Moreover, the Pearson correlation coefficient in this comparison is 0.75, indicating a strong correlation between the results.

4. Results and discussion

In this study, the inorganic phase change material InfiniteRPCM21C was used, which has hysteresis behavior with a melting point of 21°C. Seven distinct modes were considered for the implementation of the phase change material in the external shell of the building: the use of the PCM on the north wall (N), east wall (E), south wall (S), west wall (W), all four walls (NEWS), ceiling (C) and finally on four walls and ceiling (NEWSC). Figure 2 shows the annual energy consumption of the building in the reference mode as well as the seven modes of implementation of the phase change material.

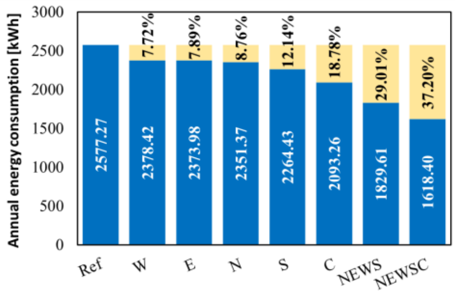


Figure 2. Annual energy consumption of the building with PCM on different walls of outer shell

The least energy saving is related to the implementation of PCM on the west wall, which has led to a 7.72% reduction in annual energy consumption. The southern wall has the best performance among the four directions with a 12.14% reduction in energy consumption. If the

*Manuscript received: August 29, 2022, Revised, September 11, 2022, Accepted, November 5, 2022.

[1] Corresponding author. Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Razi University, Kermanshah, Iran. Email: amirij@gmail.com.

[2] MSc Student, Architectural Engineering Department, Engineering Faculty, Razi University, Kermanshah, Iran.

phase change material is applied on the entire surface of the outer shell, the energy saving reaches 37.2%, which shows the impressive potential of the PCM in reducing the energy consumption of buildings.

For the purpose of economic analysis, according to Figure 3, it is possible to check the energy savings per unit mass of used PCM. Based on this, the implementation of the phase change material on the south wall causes the greatest energy savings per unit mass of the PCM, while its implementation on the entire shell of the building is not economically justified.

By examining the effect of applying the phase change material in different layers of the wall as is shown in Figure 4, it was found that the implementation on the inner surface of the wall leads to the greatest energy savings.

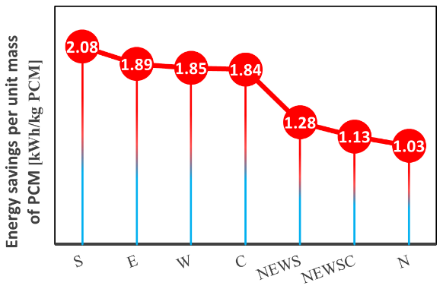


Figure 3. Energy saving per unit mass of PCM for different outer shell elements

In Type 1, the PCM is implemented as the most inner layer of the wall while in the Type 5 it is the most outer layer.

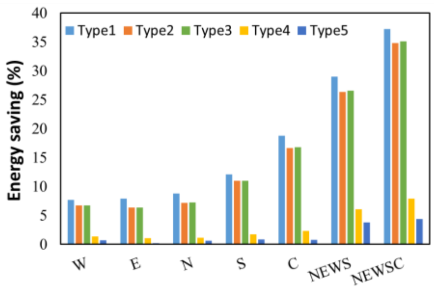


Figure 4. The effect of the position of the PCM layer on energy savings

Moreover, the effect of the thickness of the phase change material in the range of 5 to 25 mm was investigated. Figure 5 shows the results.

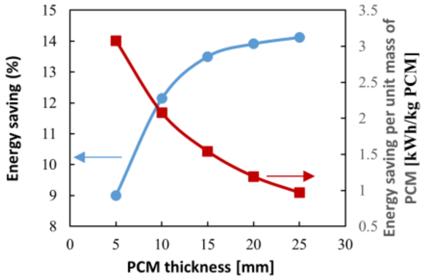


Figure 5. The effect of the PCM thickness on saving energy

According to this figure, with the increase of thickness, the rate of energy saving improvement decreases, so that in thicknesses over 20 mm, energy saving changes become insignificant. Furthermore, Figure 5 shows that with increase in thickness, the energy saving achieved per unit mass of PCM also decreases rapidly.

Finally, by implementing phase change materials with different melting temperatures in the range of 18 to 29 degrees Celsius, it was found that the maximum energy saving is achieved at the melting point of 21 °C (Figure 6).

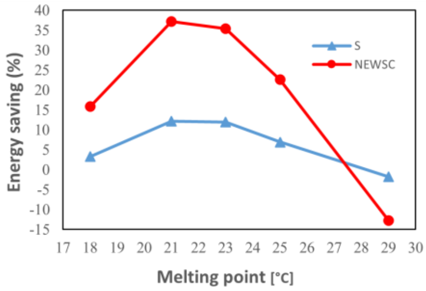


Figure 6. Effect of the PCM melting point temperature on energy saving

5. Conclusion

The implementation of phase change materials in the building shell reduces the energy consumption of the building. Among the four cardinal directions, the southern wall has the most energy savings with a 12.14% reduction in consumption. If the phase change material is implemented on the entire building shell, the amount of energy saving increases to 37.2%. From the economic point of view, the southern wall has the best performance among all the examined cases, saving 2.08 kWh per kilogram of PCM.

The phase change material should be implemented on an inner layer relative to the thermal insulation of the building. Otherwise, up to 90% of achievable energy saving will be lost. Although the energy consumption of buildings decreases with the increase of PCM thickness, smaller thicknesses are more suitable economically. For example, by increasing the thickness from 5 to 25 mm, the amount of energy saving per kilogram of PCM decreases from 3.08 to 0.97 kWh. In any case, by increasing the PCM thickness beyond 20 mm, no significant change in energy saving is observed.

The PCM melting point should be chosen according to the weather conditions. Compared to thermal insulation, if the phase change material is implemented as the inner layer of the wall, its melting point should be within the comfort temperature range. For the conditions applied in this research, the highest annual energy savings were obtained for PCM with a melting point of 21°C.



علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

بررسی تأثیر مواد تغییر فاز دهنده بر مصرف انرژی در ساختمان‌های امدادی پیش‌ساخته سبک‌وزن*

مقاله پژوهشی

علی امیری جاغرق[۱]　　　　امیر یاری‌نژاد[۲]

DOI: 10.22067/jacsm.2022.78503.1136

چکیده *در این پژوهش نقش مواد تغییر فاز دهنده در کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های پیش‌ساخته سبک‌وزن مطالعه شده است. به این منظور، یک ساختمان نمونه در شهر کرمانشاه انتخاب و در محیط نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر شبیه‌سازی شد. سرمایش و گرمایش ساختمان توسط یک دستگاه کولر اسپلیت تأمین می‌شود. اجرای ماده تغییر فاز دهنده در تمام جهات شامل تک‌تک دیوارها، سقف، چهار دیوار به‌صورت هم‌زمان و کل پوسته بررسی شد. دیوار جنوبی با کاهش ۱۲/۱٤ درصدی انرژی مصرفی، بهترین گزینه در بین دیوارها است. از دیدگاه اقتصادی نیز این دیوار با صرفه‌جویی ۲/۰۸ کیلووات ساعت انرژی به ازای هر کیلوگرم ماده تغییر فاز دهنده، بهترین عملکرد را دارد. اجرا روی کل پوسته ساختمان، صرفه‌جویی را تا ۳۷/۲ درصد افزایش می‌دهد. هرچند که این حالت به لحاظ اقتصادی توجیه ندارد، اما از دیدگاه تأمین آسایش در چهار ماه از سال نیاز به انرژی را تقریباً به صفر می‌رساند. با بررسی ماده تغییر فاز دهنده در لایه‌های مختلف دیواره، مشخص شد در تمامی جهات، اجرا روی سطح داخلی دیواره منجر به بیشترین صرفه‌جویی می‌شود. هم‌چنین بررسی ضخامت ماده تغییر فاز دهنده در بازه ۵ تا ۲۵ میلی‌متر نشان داد هرچه ضخامت کمتر باشد، صرفه‌جویی در واحد جرم ماده بیشتر می‌شود. افزایش ضخامت به بیش از ۲۰ میلی‌متر تأثیر قابل توجهی در صرفه‌جویی انرژی ندارد. در نهایت اثر نقطه ذوب در بازه ۱۸ تا ۲۹ درجه سلسیوس بررسی و معلوم شد در نقطه ذوب ۲۱ درجه سلسیوس بیشترین صرفه‌جویی به‌دست می‌آید.*

واژه‌های کلیدی مواد تغییر فاز دهنده، مصرف انرژی، آسایش حرارتی، ساختمان پیش‌ساخته، سبک‌وزن، دیزاین‌بیلدر.

Investigating the Effect of Phase Change Materials on Energy Consumption in Lightweight Prefabricated Relief Buildings

Ali Amiri-Jaghargh　　　　Amir Yarinezhad

Abstract *In this research, the role of Phase Change Materials (PCM) in energy saving in lightweight prefabricated buildings is studied. For this purpose, a typical building in Kermanshah, Iran is simulated in DesignBuilder software. A split unit is used as air conditioning system. The annual energy consumption of the building in the reference state is 2577.27 kWh. The implementation of the PCM was investigated in all directions including each individual wall, ceiling, four walls simultaneously and the entire building envelope. The southern wall is the best option among the walls with 12.14% energy saving. From an economic point of view, this wall has the best performance as well by saving 2.08 kWh/kgPCM. Implementation on the entire envelope increases savings up to 37.2%. Although this is not an economical case, but it reduces the need for energy to almost zero in four months of the year. By examining the PCM in different layers of the wall, it was found that in all directions, the inner surface of the wall leads to the greatest energy savings. Also, taking account the PCM thickness in the range of 5 to 25 mm showed that the smaller the thickness, the greater the savings per unit mass of the PCM. Therefore, thicknesses more than 20 mm are not recommended. Finally, the effect of the PCM melting point in the range of 18 to 29 degrees Celsius was investigated and it was found that the maximum energy saving is obtained at the melting point of 21 degrees Celsius.*

Key Words Phase change materials, PCM, Energy saving, Thermal comfort, Prefabricated building, DesignBuilder.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۱٤۰۱/٦/۷و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۱/۸/۱٤ می‌باشد.

(۱) استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران .

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معماری، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

Email: amirij@gmail.com

مقدمه

با افزایش نگرانی‌ها در مورد گرمایش جهانی و تغییرات آب و هوایی، توجه بیشتری به تلفات انرژی در ساختمان‌ها معطوف شده است زیرا بیش از ٤٠ درصد از مصرف انرژی جهانی و ٣٥ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای مربوط به بخش ساختمان است [1,2]. از سال ٢٠١٠ تا ٢٠٢٠ مصرف انرژی در خاورمیانه ٢٤/٢ درصد افزایش یافته است؛ چرا که در طی این سال‌ها علی‌رغم بروز سریع‌تر آثار گرمایش زمین در این منطقه نسبت به سایر مناطق جهان، سهم انرژی‌های تجدیدپذیر رشد چندانی نداشته است [3].

با توجه به توسعه فناوری ساخت و ساز در سال‌های اخیر، مفهوم استانداردسازی طراحی و به کارگیری سازه‌های پیش‌ساخته، به تدریج تبدیل به یک روند در صنعت ساختمان شده است [4]. یک مزیت مهم ساخت و ساز ساختمان‌های پیش‌ساخته، تأثیر مثبت آن بر محیط زیست است، به نحوی که انتشار کربن دی‌اکسید در این روش تنها ٣٧ درصد ساخت و سازهای سنتی است. همچنین این روش در مقایسه با ساخت و سازهای سنتی، باعث افزایش ٢٠ درصدی نرخ استفاده از منابع و کاهش ٣٤٫٥٥ درصدی اتلاف مصالح ساختمانی می‌شود [5].

ساختمان‌های پیش‌ساخته قابل حمل‌ونقل در کاربری‌های مختلفی استفاده می‌شوند که از آن میان می‌توان به مراکز فوریت‌های پزشکی، مراکز امداد جاده‌ای و مراکز امدادی هلال احمر اشاره کرد. هرچند سبک بودن این ساختمان‌ها مزیت زیادی در جابه‌جایی آسان آن‌ها دارد، اما به لحاظ انتقال حرارت، منجر به بروز مشکلاتی نظیر هدایت حرارتی بالا و اینرسی حرارتی کم پوسته ساختمان می‌شود [6,7]. این معایب باعث نو سانات دمایی قابل توجه در داخل ساختمان‌های پیش ساخته به‌ویژه در مناطق دارای آب و هوای شدید (Extreme climate) می شود، به نحوی که در روزهای گرم تابستانی دما بسیار بالا و در شب‌های سرد زمستانی دما بسیار پایین می‌آید. بنابراین با هدف جلوگیری از اتلاف بیش از حد انرژی در ا ستفاده طولانی مدت از ساختمان‌های پیش‌ساخته، باید تمهیداتی برای بهبود شرایط دمایی با بهره‌گیری از روش‌های غیرفعال اندیشیده شود [7].

امروزه با استفاده از فناوری‌ها و مصالح ساختمانی نوین مانند آئروژل، پانل‌های پر شده با گاز، فوم‌های سلول بسته، پانل‌های عایق خلأ و مواد تغییر فاز دهنده (Phase Change Materials (PCM))، امکان بهبود شرایط حرارتی داخلی به‌صورت غیر فعال فراهم شده است [8]. در این بین مواد تغییر فاز دهنده دارای ویژگی ظرفیت گرمای نهان بالا و تغییر دمای کم در طول فرایند تغییر فاز هستند؛ بنابراین گزینه مناسبی برای بهبود بهره‌وری انرژی و آسایش حرارتی در ساختمان‌ها محسوب می‌شوند [9-12]. مواد تغییر فاز دهنده تنوع زیادی دارند که از آن میان، موادی که نقطه ذوب آن‌ها در محدوده آسایش حرارتی قرار دارد، برای کاربردهای ساختمانی مناسب هستند. این مواد هنگام افزایش دما به بالای نقطه ذوب، ضمن جذب گرمای محیط ذوب می‌شوند. از طرفی در صورت کاهش دما به پایین‌تر از نقطه ذوب، گرمای جذب شده را به محیط پس داده و دوباره منجمد می‌شوند. به این ترتیب بدون صرف انرژی به حفظ دما در محدوده آسایش کمک می‌کنند. این ویژگی‌ها باعث شده کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در بهبود شرایط حرارتی داخل ساختمان، مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گیرد.

برای اجرای مواد تغییر فاز دهنده در ساختمان، مصالح ساختمانی نوین متنوعی پیشنهاد شده است. مانند تخته گچی با پارافین ریز محصور شده [13] که راه حلی امیدوارکننده برای افزایش ظرفیت حرارتی ساختمان‌های سبک‌وزن است، گچ با پارافین ریز کپسوله شده [14] که می‌تواند بر روی سطح دیوارها اعمال شود، بتن با پارافین ریز کپسوله شده [15]، پانل‌های پارافین تثبیت شده [16]، آجرهای حاوی مواد تغییر فاز دهنده [17] و چوب با ترکیب مواد تغییر فاز دهنده [18]. از این مصالح می‌توان در بخش‌های مختلف ساختمان مانند دیوار خارجی، دیوار ترومپ و سیستم گرمایش از کف استفاده کرد. همچنین این امکان وجود دارد که با طراحی مخازن حاوی مواد تغییر فاز دهنده و ترکیب آن با سیستم سرمایشی و گرمایشی، اقدام به ذخیره‌سازی انرژی در ساختمان نمود.

پیشینه تحقیق

مارین و همکاران [19] با استفاده از نرم‌افزار انرژی‌پلاس اثر استفاده از تخته‌های گچی تقویت‌شده با مواد تغییر فاز دهنده را در ساختمان‌های سبک وزن بررسی کردند. آنها با مطالعه شهرهای مختلف، نشان دادند استفاده از مواد تغییر فاز دهنده نقش به‌سزایی در افزایش عملکرد انرژی ساختمان در فصول گرم و سرد در

مناطق آب و هوای معتدل، خشک و گرم دارد. نتایج نشان داد هرچه اینرسی حرارتی ساختمان کمتر باشد، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده منجر به صرفه‌جویی انرژی بیشتری می‌شود. سانیک و همکاران [20] تأثیر استفاده از هیدرات نمک یوتکتیک با دمای تغییر فاز تقریباً ۲۱ درجه سلسیوس را بر تغییرات دمایی یک خانه پیش‌ساخته چوبی مطالعه کردند. مقدار ۶۰۰ کیلوگرم از ماده تغییر فاز دهنده در کف، سقف و دیوارها قرار گرفت و داده‌های دما در طول ۱۰ ماه تحت شرایط محیطی واقعی جمع‌آوری شد. نتایج نشان داد استفاده از هیدرات‌های نمک مقرون به صرفه بوده و تأثیر مثبت معناداری بر رفتار حرارتی خانه‌های چوبی پیش ساخته دارند. ژو و همکاران [21] با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلوئنت، کاربرد مواد تغییر فاز دهنده را در ساختمان‌های سبک‌وزن با ضریب شکل بالا، برای اسکان موقت در آب و هوای تابستانی شهر تیانجین مطالعه کردند. آنها با بررسی پارامترهایی مانند موقعیت، ضخامت و جهت اعمال ماده تغییر فاز دهنده نشان دادند استفاده از یک لایه ۵ میلی‌متری از این ماده روی سطح داخلی ساختمان، به وضوح می‌تواند آسایش حرارتی را بهبود بخشد. فاتح و همکاران [22] با ارائه یک مدل دینامیک برای محاسبه انتقال حرارت در مواد تغییر فاز دهنده، اثر جهت‌گیری محل نصب، دمای تغییر فاز و ضخامت ماده تغییر فاز دهنده را در دیوارهای سبک وزن بررسی کردند. آنها دریافتند که ماده تغییر فاز دهنده با ضخامت ۲۰ میلی‌متر و دمای تغییر فاز ۲۳ درجه سلسیوس که در جهت جنوب قرار گیرد، بهترین اثر صرفه‌جویی در انرژی را دارد.

وانگ و همکاران [23] در یک مطالعه تجربی، تأثیر مواد تغییر فاز دهنده بر دمای هوای داخل یک ساختمان پیش ساخته با کاربری امدادی را در فصل تابستان بررسی کردند. ماده تغییر فاز دهنده با ضخامت ۲۰ میلی‌متر سمت داخلی دیوار نصب شد. نتایج نشان داد با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده، هم دمای هوای داخل و هم دمای سطح داخلی دیوار کاهش می‌یابد. آنها همچنین پیشنهاد دادند با هدف شارژ ماده تغییر فاز دهنده، این مواد در ساعات شب از ساختمان خارج شود. در این حالت با استفاده از ۱۴۸٫۸ کیلوگرم ماده تغییر فاز دهنده روی سطح داخلی دیوار غربی، دمای هوای داخلی بیش از ۳ درجه سلسیوس کاهش یافت. وانگ و همکاران [24] در مطالعه بعدی خود، با استفاده از نرم‌افزار انرژی‌پلاس ایده به‌کارگیری مواد تغییر فاز دهنده قابل حمل را توسعه دادند. در این مطالعه ماده تغییر فاز دهنده که به تفکیک روی سطح داخلی سقف و دیوارها قرار داده شده بود، در زمان شب به بیرون ساختمان پیش ساخته انتقال داده می شد. نتایج نشان داد اعمال ماده تغییر فاز دهنده روی دیوار غربی منجر به کمترین دمای داخلی می‌شود. هرچند که با اعمال همزمان ماده تغییر فاز دهنده بر تمام سطوح داخلی، نتیجه مطلوب‌تری حاصل می‌شود. همچنین با بررسی ضخامت‌های مختلف ماده تغییر فاز دهنده، نشان داده شد با افزایش ضخامت تا ۲۰ میلی‌متر عملکرد حرارتی ساختمان بهبود می‌یابد در حالی که افزایش بیشتر ضخامت تأثیر قابل توجهی بر بهبود دمای داخل ندارد.

جیا و همکاران [4]، عملکرد حرارتی و مصرف انرژی ساختمان پیش ساخته مسلح به مواد تغییر فاز دهنده را با استفاده از نرم افزار انرژی‌پلاس در پنج منطقه مختلف اقلیمی بررسی کردند. نتایج نشان داد نصب مواد تغییر فاز دهنده در سمت داخل ساختمان نسبت به سمت بیرون، منجر به صرفه‌جویی بیشتری در مصرف انرژی می‌شود. آنها نشان دادند بیشترین صرفه‌جویی انرژی به ازای واحد سطح ماده تغییر فاز دهنده مصرف شده، با نصب این مواد بر دیوارهای شرقی و غربی ساختمان حاصل می‌شود. همچنین معلوم شد ضخامت بهینه ماده تغییر فاز دهنده به شرایط آب و هوایی بستگی دارد. محسنی و تانگ [25] با استفاده از نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر، کارایی مواد تغییر فاز دهنده را در کاهش بارهای حرارتی و سرمایشی ساختمان‌های سبک وزن، در استرالیا مطالعه کردند. مواد تغییر فاز دهنده با دمای ذوب بین ۱۹ تا ۲۹ درجه سلسیوس و ضخامت‌های ۵ و ۱۰ میلی‌متر در عناصر مختلف ساختمان استفاده شد. آنها نشان دادند اگرچه عملکرد ماده تغییر فاز دهنده به فصل (تابستان یا زمستان) بستگی دارد، ولی برای نمونه مطالعه شده، در مجموع ماده با دمای ذوب ۲۱ درجه سلسیوس دارای بهترین عملکرد می‌باشد. به‌علاوه نشان داده شد استفاده از ماده تغییر فار دهنده با ضخامت ۱۰ میلی‌متر همزمان در سقف و دیوار، بهترین عملکرد را در کاهش مصرف انرژی و انتقال بار از زمان پیک تقاضا دارد. تحلیل اقتصادی و زیست‌محیطی نشان داد در این حالت، انتشار دی‌اکسید کربن در یک دوره ۵۰ ساله، در مجموع حدود ۲۶۴ تن کاهش خواهد یافت و دوره بازگشت سرمایه ۱۶٫۶ سال خواهد بود.

لیو و همکاران [26] به‌صورت عددی تأثیر خواص

ترموفیزیکی مواد تغییر فاز دهنده و همچنین ضخامت و موقعیت اعمال آنها را بر عملکرد حرارتی دیوارهای سبک وزن بررسی کردند. با توجه به نتایج، هرکدام از خواص ترموفیزیکی نقطه بهینه مخصوص به خود را دارد. اما به طور کلی، تأثیر مواد تغییر فاز دهنده با افزایش گرمای نهان به بیش از ۱۷۵ kJ/kg کاهش می‌یابد. تأثیر این مواد در ضرایب رسانندگی کمتر از W/m.K ۰٫۲۵ واضح‌تر است و با افزایش ضریب رسانندگی کم‌رنگ می‌شود. تحلیل اقتصادی و حرارتی نشان داد ضخامت ماده تغییر فاز دهنده نباید به بیش از ۱۰ میلی‌متر برسد و موقعیت نصب آن نیز در لایه میانی بهتر از سطح داخلی یا خارجی دیوار است. کیشور و همکاران [27]، با استفاده از شبیه‌سازی عددی، هشت پارامتر مواد تغییر فاز دهنده را بررسی کردند؛ که شامل موقعیت ماده در لایه‌بندی دیوار، دمای انتقال، ضخامت، گرمای نهان، محدوده انتقال، چگالی، گرمای ویژه و هدایت حرارتی است. نتایج نشان داد که ماده تغییر فاز دهنده بهینه‌شده در این مطالعه، می‌تواند به طور کامل پروفیل گذرای گرمای جذب شده در دیوار را معکوس کند، به نحوی که گرمای لحظه‌ای جذب شده در ساعات اوج مصرف تا ۷۰ در صد کاهش یابد، بدون این‌که در گرمای کل جذب شده در فصل گرم افزایشی مشاهده شود.

بررسی مطالعات در دسترس نشان‌دهنده اهمیت به‌کارگیری مواد تغییر فاز دهنده در ساختمان‌ها است. پارامترهای مختلف این مواد به لحاظ خواص ترموفیزیکی و همچنین نحوه اجرا در ساختمان، در مقالات متعدد مطالعه شده و ضمن تأیید اثر بخشی مواد تغییر فاز دهنده در کاهش مصرف انرژی ساختمان، نقاط بهینه پارامترهای مذکور معرفی شده است. اما در این نتایج تفاوت و در بعضی موارد تناقض‌هایی وجود دارد که ناشی از تفاوت در روش ساخت ساختمان، اقلیم آب و هوایی و موقعیت جغرافیایی است. بنابراین در کاربری‌های خاص و یک منطقه مشخص، برای دستیابی به حالت بهینه لازم است این مطالعات تکرار شوند.

در مطالعه پیش رو به بررسی تأثیر مواد تغییر فاز دهنده، بر مصرف انرژی و تأمین شرایط آسایش، در ساختمان‌های پیش‌ساخته سبک‌وزن امدادی پرداخته شده است. در حال حاضر تعداد زیادی از این ساختمان‌ها در سطح کشور در حال خدمت‌رسانی هستند. با این حال مطابق بهترین دانش نویسندگان، مطالعات چندانی در این زمینه برای شرایط آب و هوایی ایران انجام نشده است؛ و این پژوهش جزو پیشگامان این زمینه می‌باشد. در این مطالعه با بررسی یک نمونه موردی مستقر در شهر کرمانشاه، تأثیر پارامترهای مهم مواد تغییر فاز دهنده مانند ضخامت، نقطه ذوب، جهت و لایه اجرا، بر میزان صرفه‌جویی انرژی با جزئیات بررسی شده است. همچنین با ارائه تحلیل اقتصادی و تحلیل آسایشی، شرایط مناسب استفاده از این مواد ارزیابی شده است. به‌علاوه سعی شده است با بررسی تغییرات لحظه‌ای دمای هوا و هم‌چنین سطوح داخلی و خارجی دیواره‌های ساختمان، چگونگی عملکرد مواد تغییر فاز دهنده تشریح شود که در مطالعات قبلی به این مورد پرداخته نشده است.

روش تحقیق

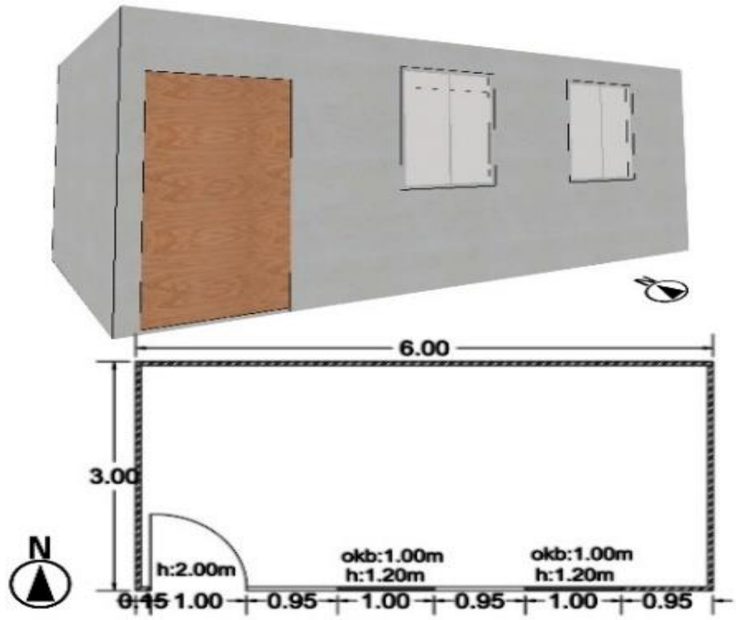
با هدف بررسی آثار استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در ساختمان‌های پیش‌ساخته امدادی جاده‌ای، یک واحد نمونه امدادی در شهر کرمانشاه در نظر گرفته شده و مصرف انرژی سالیانه آن با نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر شبیه‌سازی شده است. این نرم‌افزار که از موتور انرژی‌پلاس برای تحلیل انرژی بهره می‌برد قادر است محاسبات مربوط به بارهای گرمایشی و سرمایشی، آسایش حرارتی، تابش خورشیدی، روشنایی و سایه‌اندازی را با دقت بالایی انجام دهد.

ساختمان نمونه

مورد مطالعه، ساختمانی پیش ساخته (کانکس) به مساحت ۱۸ متر مربع و ارتفاع ۲٫۵ متر است که در شکل (۱) نشان داده شده است.

ساختمان با استفاده از پانل‌های ساندویچی سبک، متشکل از ورق‌های فولادی مجهز به عایق پلی‌استایرن، ساخته شده است و دارای یک فضای خدماتی به ابعاد ۳ m × ٦ m می‌باشد که امکان استقرار نیروهای امدادی را در مکان‌های مختلف اعم از جاده و سطح شهر فراهم می‌کند. در دیوار جنوبی ساختمان، دو پنجره دوجداره با قاب آلومینیومی حرارت‌شکن به ابعاد ۱٫۲ m × ۱ m و یک در ورودی به ابعاد ۲ m × ۱ m قرار دارد. روی

دیوارهای دیگر هیچ بازشـــویی وجود ندارد. با توجه به اینکه ساختمان روی شا سی سوار می شود، کف در تماس با زمین نیست. جنس و ضخامت مواد به کار رفته در پو سته ساختمان مرجع به همراه خواص ترموفیزیکی آنها در جدول (۱) آمده است.



شکل ۱ نما و پلان ساختمان تحت مطالعه

جدول ۱ خواص ترموفیزیکی مواد و لایه‌بندی پوسته ساختمان مرجع به ترتیب از بیرون به داخل

جدار	ماده	ضخامت mm	رسانندگی‌گرمایی W/m.K	گرمای‌ویژه J/kg.K	چگالی kg/m^3
دیوار خارجی و سقف	ورق فولادی	۱	۳۶	٤٦٠	۸۰۰۰
	پلی‌استایرن	٤۰	۰٫۰٤	۱٤۰۰	۱۵
	ورق فولادی	۱	۳۶	٤٦٠	۸۰۰۰
	تخته گچی	۸	۰٫۲۵	۱۰۰۰	۹۰۰
پنجره	شیشه شفاف	٦	۰٫۹		
	لایه هوا	۱۳	۰٫۰۲٦		
	شیشه شفاف	٦	۰٫۹		
قاب	آلومینیوم حرارت‌شکن	٤۰	۰٫۲		
در	تخته سه‌لا	۳۵	۰٫۰۸۷		
کف	ورق فولادی	۱	۳۶	٤٦٠	۸۰۰۰
	پلی‌استایرن	٤۰	۰٫۰۳۵	۱۱۰۰	۲۰
	ورق فولادی	۱	۳۶	٤٦٠	۸۰۰۰
	کفپوش‌چوبی	۵	۰٫۱٤	۱۲۰۰	٦۵۰

شرایط دمایی و آب و هوایی

داده‌های آب و هوایی شهر کرمانشاه برای یک دوره یک ساله، از پایگاه داده لیدی‌باگ‌تولز [28] بر اساس میانگین داده‌های بلندمدت تهیه شده است. دمای طرح داخل در تابستان برابر °C ۲٤ و در زمستان برابر °C ۱۸ اعمال شده است.

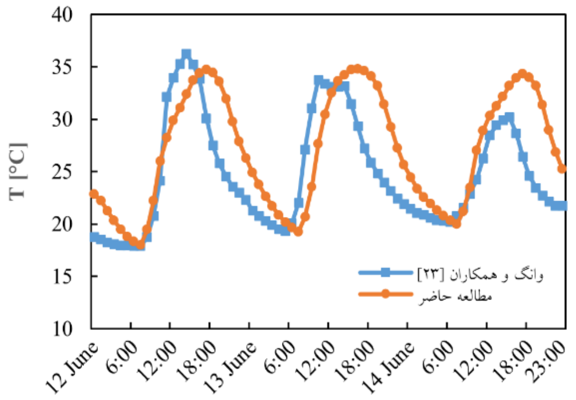
ملاحظات مصرف انرژی

در کاربری امدادی، تعداد افراد ساکن در ساختمان ۲ نفر با برنامه حضور ۲٤ ساعت در ۷ روز هفته است. سیستم روشنایی چراغ ال‌ای‌دی و شدت روشنایی مورد نیاز ۳۰۰ lux است که با توجه به بهره نوری لامپ‌های معمول، معادل W ۵۵ می‌شود. تجهیزات الکترونیکی معمول در کاربری امدادی شامل یک دستگاه کامپیوتر است که معمولاً روشن می‌باشد، و تعدادی دستگاه‌های تشخیصی که در مواقع نیاز روشن می شوند. توان مصرفی این تجهیزات در مجموع برابر W ۲۰۰ در نظر گرفته شده است. برنامه عملکرد روشنایی و تجهیزات نیز به صورت ۲٤ ساعت در ۷ روز هفته اعمال شده است. سیستم تهویه مطبوع ساختمان، یک دستگاه کولر اسپلیت با ضریب عملکرد ۳/۵ است که همواره آماده به کار بوده و با توجه به دمای داخل، سرمایش یا گرمایش لازم را تأمین می‌کند.

اعتبارسنجی

در مطالعه وانگ و همکاران [28] روی ساختمان‌های پیش‌ساخته که در شهر چنگدو چین انجام شد، دمای هوای داخل یک ساختمان مجهز به مواد تغییر فاز دهنده در روزهای ۱۲ تا ۱٤ ژوئن اندازه‌گیری شده است. با هدف اعتبارسنجی مطالعه حاضر، ساختمان مشابهی طراحی و پاسخ دمایی آن در شرایط آب و هوایی شهر چنگدو شبیه‌سازی شد.

در شکل (۲) تغییرات دمای هوای داخل ساختمان حاصل از مطالعه تجربی، با نتایج شبیه سازی حاضر مقایسه شده است. میانگین خطای مطلق در این شکل °C ۳/٦ است که مؤید انطباق خوب نتایج می‌باشد. توجه به این نکته ضروری است که شبیه‌سازی بر اساس میانگین داده‌های آب و هوایی بلندمدت انجام شده است در حالی که اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی به شرایط لحظه‌ای وابسته است. به عنوان مثال در روز سوم آزمایش که آسمان ابری، و تابش خورشید نسبت به میانگین بلندمدت کمتر بوده است، اختلاف بیشتری بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی مشاهده می‌شود. به همین دلیل در مقایسه‌های این‌چنین، که مبتنی بر داده‌های آماری است، بررسی مطابقت رفتار نمودارها اهمیت بیشتری از خطای مطلق دارد.

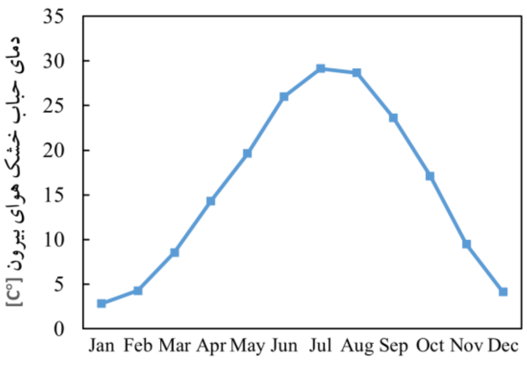


شکل ۲ مقایسه نتایج کار حاضر با داده‌های تجربی وانگ و همکاران [23]

برای بیان میزان مطابقت رفتار نتایج، می‌توان از ضریب همبستگی پیرسون (Pearson correlation coefficient) استفاده کرد. این ضریب که عددی بین ۱- و ۱ است، به‌صورت حاصل تقسیم کوواریانس داده‌های دو نمودار بر انحراف معیار آن‌ها تعریف می‌شود. هرچه قدرمطلق ضریب همبستگی به یک نزدیک‌تر باشد، همبستگی قوی‌تر بین داده‌ها برقرار است. مقدار ضریب همبستگی پیرسون برای داده‌های شکل (۲) برابر ۰/۷۵ است که نشان از همبستگی قوی بین نتایج دارد [29].

نتایج و بحث

ساختمان بررسی شده در شهر کرمانشاه قرار دارد. تغییرات دمای متوسط ماهیانه شهر کرمانشاه در شکل (۳) نشان داده شده است. مطابق این شکل، جولای و آگوست گرم‌ترین و ژانویه، فوریه و دسامبر سردترین ماه‌های سال در کرمانشاه هستند.



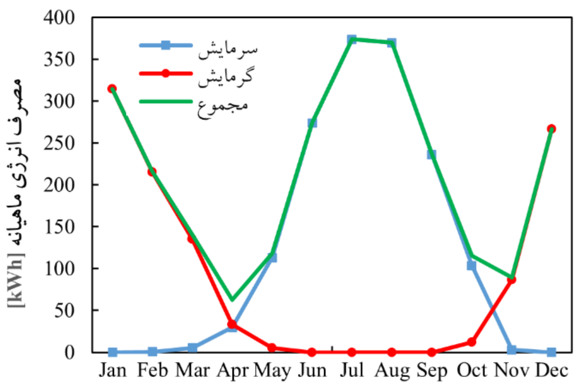
شکل ۳ تغییرات سالیانه دمای هوای کرمانشاه

جدول ۲ مشخصات ترموفیزیکی ماده تغییر فاز دهنده InfiniteRPCM21C

	هدایت حرارتی W/m.K	بازه تغییر فاز °C	چگالی kg/m^3	گرمای ویژه J/kg.K	گرمای نهان J/kg.K
حالت مایع	۰٫۵۴	۲۱ – ۲۳	۱۵۴۰	۳۱۴۰	۲۰۰۰۰۰
حالت جامد	۱٫۰۹	۲۱ – ۱۹			

ساختمان مرجع

با هدف تمرکز بر تأثیر مواد تغییر فاز دهنده بر مصرف انرژی ساختمان، از عواملی که کنترل دقیقی بر آنها نیست مانند باز و بسته شدن در و پنجره‌ها صرف‌نظر شده است. همچنین با فرض درزبندی کامل، از نفوذ هوا به درون ساختمان صرف‌نظر شده است. در شکل (۴) میزان مصرف انرژی ساختمان مرجع نشان داده شده است که شامل انرژی الکتریکی مصرف شده توسط سیستم تهویه مطبوع می‌باشد. همچنین در این شکل مقدار انرژی صرف شده برای گرمایش و سرمایش تفکیک شده است. مشاهده می‌شود مصرف انرژی گرمایشی ساختمان در ماه‌های گرم سال (می تا سپتامبر) تقریباً صفر بوده و در ماه‌های سرد به ویژه ژانویه، فوریه و دسامبر قابل توجه است. مصرف سالیانه انرژی گرمایشی ساختمان ۱۰۶۸٫۱۲ کیلووات ساعت می‌باشد.



شکل ۴ مصرف انرژی ساختمان مرجع

مصرف سرمایشی ساختمان در ماه‌های سرد صفر و در ماه‌های گرم قابل توجه است؛ به طوری که هماهنگ با تغییرات دمای متوسط ماهیانه (شکل ۳)، در ماه‌های جولای و آگوست به بیشترین مقدار خود می‌رسد. مصرف سالیانه انرژی سرمایشی ۱۵۰۹٫۱۵ کیلووات ساعت است. کل مصرف انرژی ساختمان توسط سیستم تهویه مطبوع ۲۵۷۷٫۲۷ کیلووات ساعت می‌باشد.

ساختمان مجهز به ماده تغییر فاز دهنده

در این مطالعه از ماده تغییر فاز دهنده InfiniteRPCM21C استفاده شده است که نقطه ذوب آن ۲۱ °C می‌باشد. خواص ترموفیزیکی این ماده در جدول (۲) آمده است. این ماده رفتار پسماند (Hysteresis) دارد به این معنی که فرایند ذوب و انجماد آن بر هم منطبق نیست. فرایند ذوب از دمای ۲۱ °C شروع و تا دمای ۲۳ °C ادامه دارد. فرایند انجماد نیز از دمای ۲۱ °C شروع و تا دمای ۱۹ °C ادامه پیدا می‌کند.

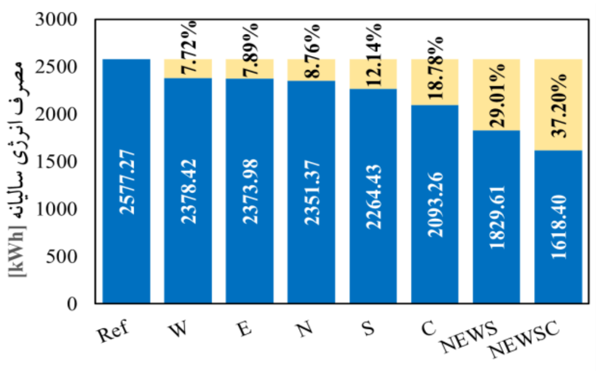
اثر جهت اجرای ماده تغییر فاز دهنده

با توجه به اینکه دیوارهای مختلف ساختمان، بسته به جهت جغرافیایی، بهره متفاوتی از انرژی خورشیدی دریافت می‌کنند، برای اجرای ماده تغییر فاز دهنده در پوسته خارجی ساختمان هفت حالت در نظر گرفته شد: استفاده از ماده تغییر فاز دهنده روی دیوار شمالی (N)، دیوار شرقی (E)، دیوار جنوبی (S)، دیوار غربی (W)، هر چهار دیوار (NEWS)، سقف (C) و نهایتاً روی چهار دیوار و سقف (NEWSC). در این مرحله ماده تغییر فاز دهنده به ضخامت ۱۰ میلی‌متر روی سطح داخلی دیوارها اعمال شده است. مصرف انرژی سالیانه ساختمان در حالت مرجع به همراه حالات هفت‌گانه اجرای ماده تغییر فاز دهنده، در شکل (۵) نشان داده شده است. همچنین در این شکل درصد کاهش مصرف انرژی نسبت به ساختمان مرجع (صرفه‌جویی) نیز گزارش شده است. مطابق شکل (۵) استفاده از ماده تغییر فاز دهنده منجر به کاهش قابل توجه مصرف انرژی ساختمان شده است.

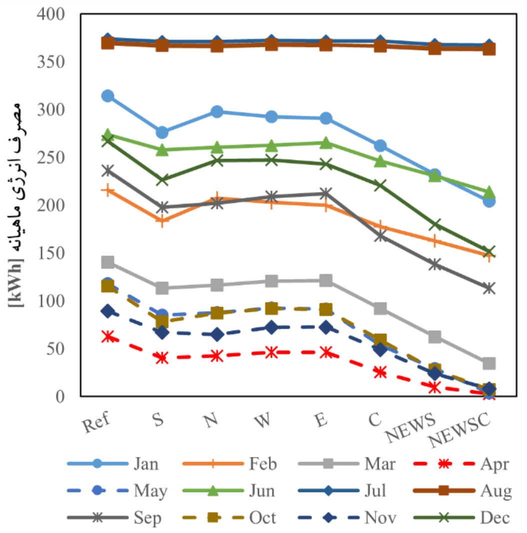
کم‌ترین بهبود مربوط به اجرا روی دیوار غربی است که منجر

به کاهش ۷٫۷۲ درصدی مصرف انرژی سالیانه شده است. دیوار شرقی نیز وضعیت مشابهی دارد. دیوار شمالی با اینکه در معرض تابش مستقیم خورشیدی نیست، اما با کاهش ۸٫۷۶ درصدی مصرف انرژی وضعیت مطلوب‌تری نسبت به دیوارهای شرقی و غربی دارد. این مطلب با توجه به مساحت بیشتر این دیوار قابل توضیح است. دیوار جنوبی با ۱۲٫۱۴ درصد کاهش مصرف انرژی بهترین عملکرد را در بین جهات چهارگانه دارد. البته باید توجه داشت به علت وجود بازشوها روی این دیوار، مساحت آن کمتر از دیوار شمالی است. اجرای ماده تغییر فاز دهنده روی سقف با کاهش ۱۸٫۷۸ درصدی مصرف انرژی، عملکرد بهتری نسبت به دیوارها دارد. چنانچه از ماده تغییر فاز دهنده به طور همزمان روی چهار دیوار ساختمان استفاده شود، کاهش قابل توجه ۲۹ درصدی مصرف انرژی حاصل می‌شود. در نهایت در صورت اجرای ماده تغییر فاز دهنده روی کل سطح پوسته خارجی (چهار دیوار به‌علاوه سقف)، کاهش مصرف انرژی به ۳۷٫۲ درصد می‌رسد که گویای پتانسیل چشم‌گیر مواد تغییر فاز دهنده در کاهش مصرف انرژی ساختمان‌ها می‌باشد. با نگاه به مصرف انرژی در ماه‌های مختلف سال، جزئیات بیشتری از نحوه تأثیرگذاری مواد تغییر فاز دهنده بر مصرف انرژی ساختمان آشکار می‌شود. به این منظور مصرف انرژی در ساختمان مرجع و همچنین هفت حالت اجرای ماده تغییر فاز دهنده، به تفکیک ماه‌های مختلف در شکل (٦) رسم شده است.

ملاحظه می‌شود اجرای ماده تغییر فاز دهنده باعث کاهش مصرف انرژی در تمام ماه‌های سال می شود، هرچند مقدار این کاهش بسته به ماه‌های مختلف و جهت اجرای ماده تغییر فاز دهنده متفاوت است.



شکل ٥ مصرف انرژی سالیانه ساختمان با ماده تغییر فاز دهنده روی دیواره های مختلف پوسته خارجی



شکل ٦ تأثیر جهت اجرای ماده تغییر فاز دهنده بر مصرف انرژی ساختمان در ماه‌های مختلف

نکته قابل توجه این است که در ماه‌های جولای و آگوست، در هیچ یک از جهات، افزودن ماده تغییر فاز دهنده تأثیری بر مصرف انرژی نداشته است. با توجه به شکل (۳) مشاهده می شود دمای متو سط هوای بیرون در این دو ماه نزدیک به °C ۱۳۰ست. بررسی تغییرات ساعتی دما نیز نشان می‌دهد در این بازه دمای هوا تنها برای ٥ ساعت (۳ صبح تا ۷ صبح) به اندکی کمتر از °C ۲۱ می‌رسد. در این شرایط نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد دمای سطح داخلی دیواره‌های ساختمان همواره بالاتر از °C ۲۱ است؛ که به علت حرارت جذب شده از تابش خورشیدی و اینرسی حرارتی ساختمان می‌باشد. بنابراین چون نقطه ذوب ماده تغییر فاز دهنده °C ۲۱ است، فرصت تغییر فاز برای آن فراهم نشده و حضورش تأثیر قابل توجهی بر مصرف انرژی ندارد. از این بحث می‌توان نتیجه گرفت در اقلیم های گرم، بهتر است از مواد تغییر فاز دهنده با دمای ذوب بالاتر استفاده شود.

تحلیل آسایش

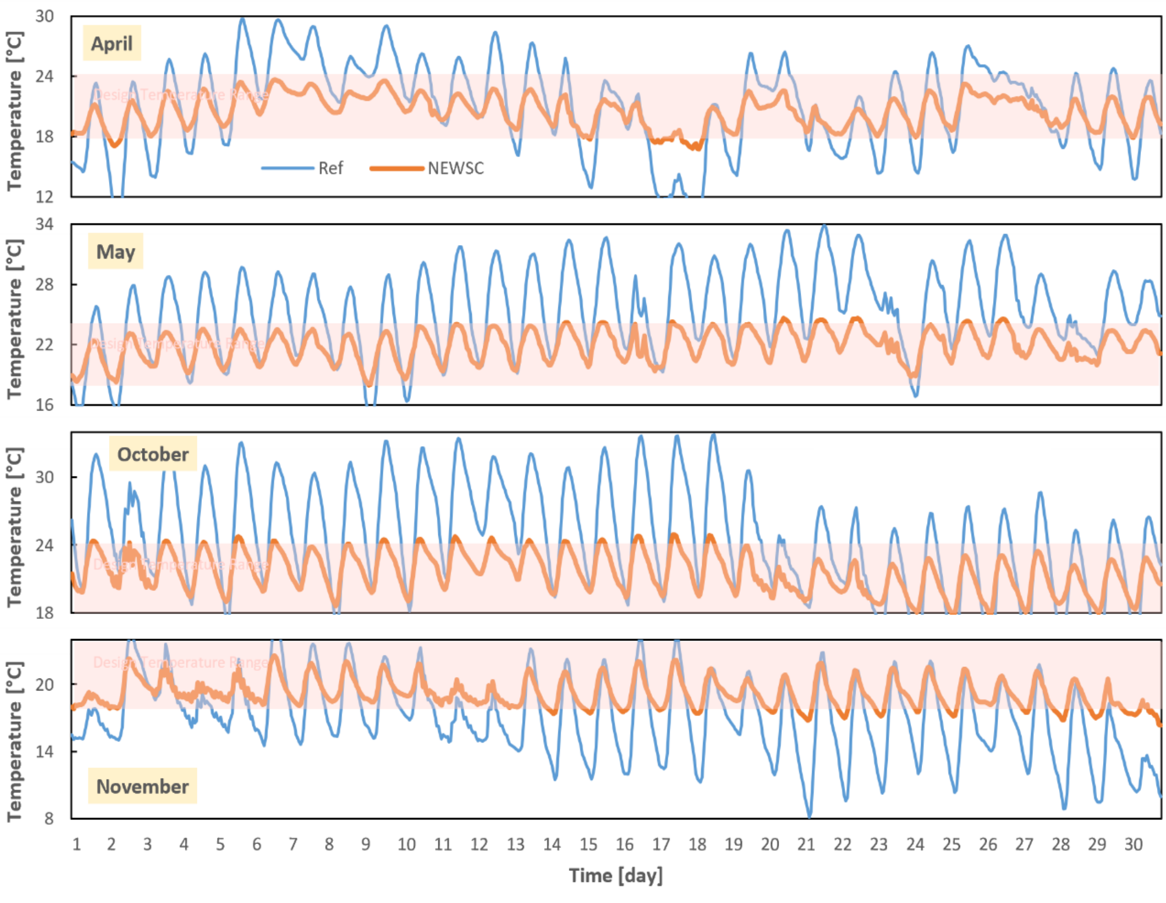
نکته حائز اهمیت دیگری که در شکل (٦) وجود دارد، آن است که در حالت اجرای ماده تغییر فاز دهنده در کل پوسته خارجی ساختمان (NEWSC)، مصرف سالیانه انرژی در ماه‌های آوریل، می، اکتبر و نوامبر به ترتیب ۹٥٪، ۹۷٪، ۹٤٪ و ۹۱٪ کاهش پیدا کرده و به صفر نزدیک شده است. یعنی در این شرایط، حتی در

صورت خاموش بودن سیستم تهویه مطبوع باز هم در اغلب اوقات شرایط آسایش فراهم است. برای بررسی این موضوع، تغییرات ساعتی دمای کارکردی (Operative Temperature) هوای داخل ساختمان‌های مرجع و NEWSC، در شرایطی که سیستم تهویه مطبوع خاموش باشد، در شکل (۷) ترسیم و مقایسه شده است.

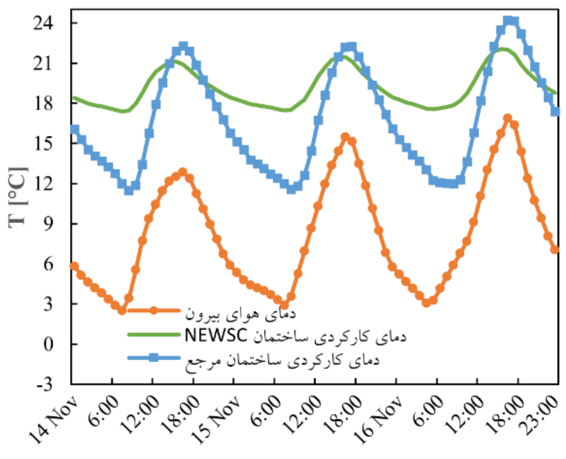
دمای کارکردی، میانگین دمای هوا و دمای سطوح داخلی است، و بنابراین آثار انتقال حرارت تشعشعی بین بدن و دیوارها در آن دیده شده است. در شکل (۷) محدوده آسایش دمایی تعریف شده برای ساختمان، یعنی بازه ۱۸ تا ۲۴ درجه سلسیوس، با نوار رنگی مشخص شده است. هرچند که در ساختمان مرجع، دمای هوا در اغلب ساعات روز خارج از محدوده آسایش است، اما تنها با استفاده از ماده تغییر فاز دهنده در ساختمان NEWSC، دمای داخل تقریباً در تمام ساعات در محدوده آسایش قرار گرفته است.

در نبود سیستم تهویه مطبوع، تغییرات دمای هوای داخل تا حد زیادی منطبق بر رفتار دمای هوای بیرون است؛ با این تفاوت که متناسب با مقاومت حرارتی و اینرسی حرارتی پوسته ساختمان مقداری اختلاف دما بین آن‌ها وجود دارد. اما در حضور ماده تغییر فاز دهنده علاوه بر این دو عامل، آزادسازی و جذب گرمان نهان طی فرایند انجماد و ذوب، موجب محدودتر شدن تغییرات دمای داخل می‌شود.

برای درک بهتر این مطلب، در شکل (۸) بر تغییرات دمای کارکردی هوا در بازه ۱۴ تا ۱۶ نوامبر تمرکز شده است. این شکل به خوبی نحوه عملکرد ماده تغییر فاز دهنده را نمایش می‌دهد. در روز ۱۴ نوامبر از ساعت صفر بامداد تا طلوع خورشید، دمای هوا روند کاهشی دارد به نحوی که دمای بیرون به ۲٫۵ °C می‌رسد. در پاسخ به این کاهش دما، دمای هوای ساختمان‌های مرجع و NEWSC نیز به ترتیب به ۱۱٫۵ و ۱۷٫۴ درجه سلسیوس می‌رسد.



شکل ۷ تغییرات ساعتی دمای کارکردی در غیاب سیستم تهویه مطبوع، در طول ماه‌های آوریل، می، اکتبر و نوامبر برای حالت NEWSC و مقایسه آن با ساختمان مرجع

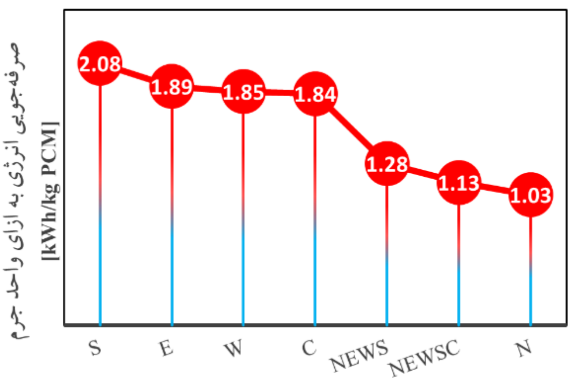


شکل ۸ تغییرات دمای هوای بیرون و دمای داخل ساختمان‌های مرجع و NEWSC طی ٤ تا ١٦ نوامبر

پس از آن تابش خور شیدی باعث گرم شدن دما می شود و دمای هوا در بیرون و درون ساختمان مرجع به ترتیب تا ١٢/٩ و ٢٢/٣ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد؛ این مقدار معادل افزایش ١١ درجه‌ای دمای هوای ساختمان مرجع است. اما در ساختمان NEWSC، با رســیدن دمای هوا به °C ٢١، بخش عمده انرژی دریافتی صــرف ذوب ماده تغییر فاز دهنده شــده و دمای هوا حداکثر به °C ٢١/١ می‌رسد؛ یعنی کمتر از °C ٤ افزایش می‌یابد. با کاهش شــار خورشــیدی و غروب خورشــید، دما شــروع به کاهش می‌کند به نحوی که تا قبل از طلوع خورشــید در ١٥ نوامبر، دمای هوای بیرون و هوای ســاختمان مرجع به ترتیب تا ٢/٩ و ١١/٦ درجه ســلســیوس کاهش می‌یابد. یعنی دمای هوای ساختمان مرجع حدود ١٢ درجه سلسیوس کاهش پیدا می‌کند. این در حالی اســت که در ســاختمان NEWSC، با کاهش دما به °C ٢١، فرایند انجماد آغاز شــده و با آزادســازی گرمای نهان ذخیره شــده، از افت شــدید دمای هوا جلوگیری می‌شــود. به نحوی که دما تنها با ٣/٦ درجه افت در نهایت به °C ١٧/٥ می‌رسد. باید توجه داشت رفتارآرمانی مواد تغییر فاز دهنده در حفظ دمای ساختمان در محدوده آسایش بدون مصرف انرژی (شکل ۷)، کاملاً به شرایط آب و هوایی، نوع ساختمان، مقدار و نوع ماده استفاده شده بستگی دارد.

تحلیل اقتصادی

بر مبنای مطالب پیش‌گفته، اجرای مواد تغییر فاز دهنده روی کل پوسته خارجی ساختمان (NEWSC)، بهترین شرایط را از نظر صــرفه‌جویی در مصــرف انرژی و ایجاد شــرایط آســایش دمایی فراهم می‌کند، اما در یک تحلیل اقتصـــادی، میزان انرژی صــرفه‌جویی شــده تنها پارامتر مطرح نیســت، بلکه هزینه انجام شــده برای تهیه مواد تغییر فاز دهنده نیز باید ســنجیده شــود. صــرف‌نظر از قیمت هر کیلوگرم از ماده تغییر فاز دهنده و محاسبات بازگشــت ســرمایه، می‌توان تحلیل را بر مبنای انرژی صرفه‌جویی شده به ازای واحد جرم ماده استفاده شده بیان کرد. به این منظور مقدار انرژی صرفه‌جویی شده در حالات هفت‌گانه اجرای ماده تغییر فاز دهنده (شکل ٥)، بر جرم ماده مصرف شده در هر حالت (که از ابعاد ساختمان قابل محاسبه است) تقسیم و نتیجه در شکل (۹) نشان داده شده است. بر اساس این شکل، از دیدگاه اقتصــادی اجرای ماده تغییر فاز دهنده روی دیوار جنوبی موجب بیشترین صرفه‌جویی به ازای واحد جرم ماده می شود. برخلاف تحلیل قبلی که دیوارهای شــرقی و غربی را گزینه‌های نامناســبی برای اجرا ماده تغییر فاز دهنده معرفی کرده بود، از دیدگاه اقتصادی، این دیوارها در رتبه‌های دوم و سوم و هم‌تراز با ســقف قرار می‌گیرند. اجرای ماده تغییر فاز دهنده روی کل پوسته ساختمان نیز توجیه اقتصادی چندانی ندارد.



شکل ۹ صرفه‌جویی انرژی به ازای واحد جرم ماده تغییر فاز دهنده برای المان‌های مختلف پوسته خارجی

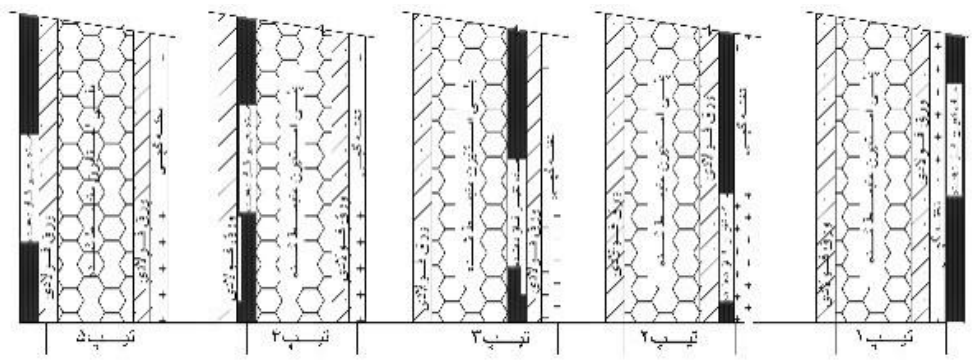
اثر لایه‌بندی

رفتار حرارتی ســاختمان دینامیکی اســت و بســته به شــرایط محیطی، دما در لایه‌های مختلف دیوار دائم در حال تغییر است. به‌علاوه با توجه به ظرفیت حرارتی بالای ماده تغییر فاز دهنده، موقعیت قرارگیری آن در دیوار به ویژه نســبت به لایه عایق

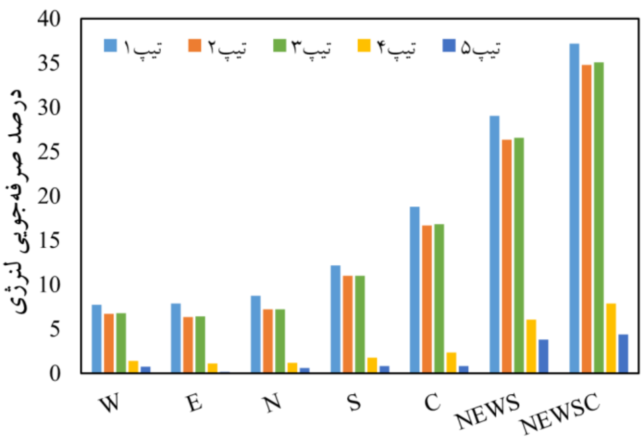
حرارتی، نقش تعیین‌کننده‌ای در اینرســی حرارتی ســاختمان و پاسخ دمایی آن به تغییرات محیطی دارد. بنابراین لازم است تأثیر قرار گرفتن ماده تغییر فاز دهنده در لایه های مختلف دیوار بررســی شــود. با توجه به اینکه دیوارهای ســاختمان مرجع از چهار لایه تشکیل شده‌اند (جدول ۱)، پنج موقعیت برای استقرار ماده تغییر فاز دهنده متصــور اســت. این پنج تیپ لایه‌بندی در شکل (۱۰) نشان داده شده است. در این شکل لایه با بافت تیره نماینده ماده تغییر فاز دهنده اســت. در تیپ ۱ ماده تغییر فاز دهنده در ســطح داخلی دیوار و در تیپ ۵ در ســطح بیرونی آن قرار دارد.

مصــرف انرژی ســاختمان در هر یک از حالات هفت‌گانه اجرای ماده تغییر فاز دهنده، برای پنج تیپ لایه‌بندی محاســبه شده است. شکل (۱۱) درصد کاهش مصرف انرژی را در هر یک از این حالات، نســبت به ســاختمان مرجع به تفکیک دیوارهای مختلف نشان می‌دهد.

ملاحظه می‌شــود در تمامی حالات، با اجرای ماده تغییر فاز دهنده روی سطح داخلی دیوار (تیپ ۱) بیشترین صرفه‌جویی حاصــل شــده اســت. نتایج تیپ ۲ و تیپ ۳ که در طرفین لایه فولادی قرار دارند، تفاوت چندانی ندارد. این رفتار با توجه به ضریب نفوذ گرمایی بالای فولاد و ضخامت بسیار کم این لایه، قابل توجیه اســت. شــکل (۱۱) گویای آن اســت که موقعیت اجرای ماده تغییر فاز دهنده نســبت به عایق حرارتی از اهمیت بالایی برخوردار است. چنانچه این ماده نسبت به عایق در سمت بیرون ســاختمان اجرا شــود، تــأثیر آن بر صــرفــه‌جویی انرژی به شــدت کاهش می‌یابد. در تیپ ٤، صــرفه‌جویی انرژی حاصله بین ۸۰ تا ۹۰ درصد نسبت به تیپ ۱ کاهش پیدا کرده است.



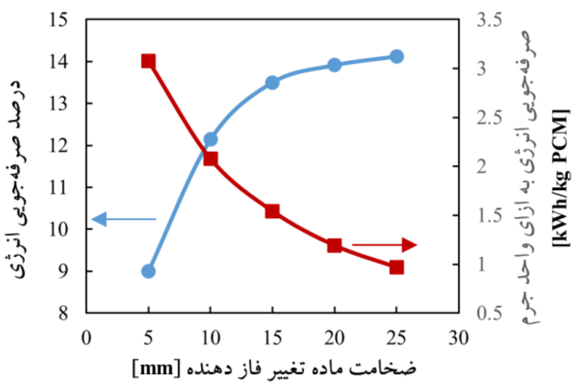
شکل ۱۰ حالات مختلف قرارگیری ماده تغییر فاز دهنده در لایه‌های دیوار



شکل ۱۱ تأثیر لایه قرارگیری ماده تغییر فاز دهنده بر صرفه‌جویی در مصرف انرژی سالیانه

اثر ضخامت ماده تغییر فاز دهنده

با افزایش حجم ماده تغییر فاز دهنده، امکان ذخیره‌سازی انرژی بیشتری فراهم می‌شود. اما باید بررسی شود که آیا بهبود حاصله، مصرف بیشتر ماده را توجیه می‌کند یا خیر. به این منظور ضخامت‌های مختلفی برای لایه ماده تغییر فاز دهنده در گستره ۵ تا ۲۵ میلی‌متر درنظر گرفته شده است. با توجه به اینکه بهترین جهت اجرای ماده تغییر فاز دهنده به لحاظ اقتصادی دیوار جنوبی است؛ و بهترین لایه نیز سطح درونی دیوار است، در این بخش مطالعه محدود به همین شرایط شده است. درصد انرژی صرفه‌جویی شده نسبت به ساختمان مرجع، به ازای ضخامت‌های مختلف ماده تغییر فاز دهنده در شکل (۱۲) نشان داده شده است.

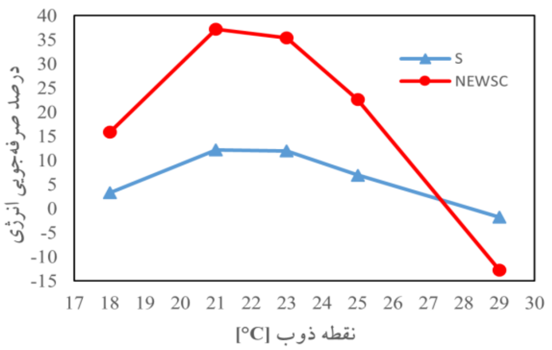


شکل ۱۲ تأثیر ضخامت لایه ماده تغییر فاز دهنده بر صرفه‌جویی در مصرف انرژی

ملاحظه می‌شود با افزایش ضخامت، نرخ بهبود صرفه‌جویی کاهش می‌یابد به نحوی که در ضخامت‌های بیش از ۲۰ میلی‌متر، تغییرات صرفه‌جویی انرژی ناچیز می‌شود. در این شکل مقدار انرژی ذخیره شده به ازای واحد جرم ماده تغییر فاز دهنده نیز نشان داده شده است. هرچند که با افزایش ضخامت، مقدار انرژی ذخیره شده افزایش پیدا می‌کند؛ اما اثربخشی ماده افزوده شده به سرعت کاهش می‌یابد. به نحوی که به ازای هر کیلوگرم ماده تغییر فاز دهنده، در ضخامت ۵ میلی‌متر ۳٫۰۸ کیلووات ساعت انرژی صرفه‌جویی شده است در حالی که با افزایش ضخامت به ۲۵ میلی‌متر این عدد به ۰٫۹۷ کاهش پیدا می‌کند.

اثر دمای ذوب ماده تغییر فاز دهنده

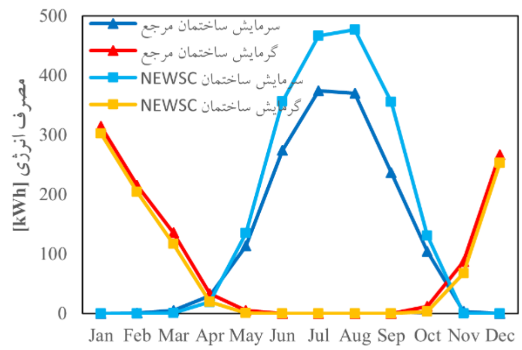
دمای دیواره ساختمان متناسب با دمای هوای بیرون و شدت تابش دریافتی از خور شید، پیو سته در حال تغییر ا ست. پا سخ گرمایی ماده تغییر فاز دهنده به این تغییرات، به نقطه ذوب آن بستگی دارد. برر سی دمای سطوح داخلی و خارجی دیواره‌های ساختمان در حالت مرجع، گویای تغییرات و سیع این پارامترها در طول سال و حتی در طول یک شبانه روز است. به عنوان مثال اختلاف دمای سطوح داخلی و خارجی بام، از ۲۸+ درجه در ۲۲ ژانویه تا ۴۳- درجه در ۵ جولای تغییر می‌کند. در این شرایط، لازم است نقطه ذوب ماده تغییر فاز دهنده به نحوی انتخاب شود که دچار بیشترین سیکل تغییر فاز شود. به این منظور مواد تغییر فاز دهنده با دمای ذوب در گستره ۱۸ تا ۲۹ درجه سلسیوس بررسی شده است. مواد استفاده شده شامل پنج نوع InfiniteRPCM18C، InfiniteRPCM21C، InfiniteRPCM23C، InfiniteRPCM25C و InfiniteRPCM29C می‌با شد، که با ضخامت ۱۰ میلی‌متر روی سطح داخلی (تیپ ۱) اجرا شده است. شکل (۱۳) درصد صرفه‌جویی به دست آمده را برای دو حالت اجرا روی دیوار جنوبی و اجرا روی کل پوسته ساختمان نشان می‌دهد.



شکل ۱۳ اثر دمای نقطه ذوب ماده تغییر فاز دهنده بر صرفه‌جویی انرژی سالیانه

مطابق این شکل در نقطه ذوب ۲۱ °C بیشترین صرفه‌جویی حاصل شده است. با افزایش نقطه ذوب به ۲۳ °C مقدار صرفه‌جویی اندکی کاهش می‌یابد. با تغییر نقطه ذوب به ۱۸ و ۲۵ درجه سلسیوس، یعنی حرکت به سمت مرز محدوده آسایش، صرفه‌جویی به میزان قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند. نکته حائز اهمیت این ا ست که در دمای ذوب ۲۹ °C، م صرف

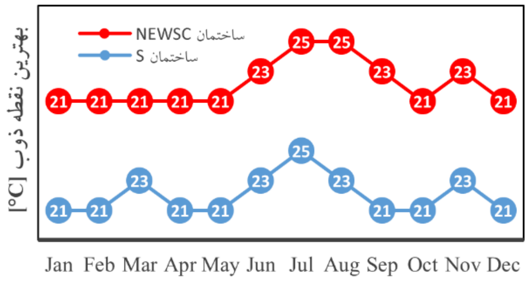
انرژی نسبت به ساختمان مرجع بیشتر شده است و استفاده از ماده تغییر فاز دهنده نتیجه معکوس داشته است. برای مشخص شدن علت این موضوع، در شکل (۱۴) مصرف ماهیانه انرژی ساختمان مجهز به InfiniteRPCM29، به تفکیک انرژی مصرف شده در سرمایش و گرمایش رسم شده است.



شکل ۱۴ اثر ماده تغییر فاز دهنده با نقطه ذوب ۲۹°C در تیپ ۱ بر مصرف انرژی سرمایشی و گرمایشی

مشاهده می‌شود با افزودن ماده تغییر فاز دهنده، مصرف انرژی گرمایشی کاهش اندکی پیدا کرده است. این مطلب به این دلیل است که در ماه‌های سرد سال، دمای سطح داخلی بام به حدی افزایش پیدا نمی‌کند که باعث تغییر فاز شود. به عنوان مثال در ماه ژانویه، حداکثر دمای سطح داخلی بام به ۲۳٫۶ °C می‌رسد. سایر دیوارها نیز شرایط مشابهی دارند. مطابق شکل (۱۴) مصرف سرمایشی ساختمان پس از اجرای ماده تغییر فاز دهنده افزایش یافته است. در ماه‌های گرم سال، در طول روز دمای سطح بیرونی بام تا حد زیادی افزایش و در طول شب کاهش پیدا می‌کند. به عنوان مثال در ماه جولای دمای سطح بیرونی بام در ساعات بعدازظهر به بیش از ۷۰ °C می‌رسد در حالی که قبل از طلوع خورشید تا دمای ۱۰ °C پایین می‌آید. در غیاب ماده تغییر فاز دهنده، همزمان با کاهش شبانه دمای سطح بام، دمای داخل ساختمان نیز کاهش یافته و با ورود به محدوده آسایش، سیستم تهویه مطبوع خاموش می‌شود. اما ماده تغییر فاز دهنده گرمای روز را ذخیره کرده و هنگام شب از افت دمای طبیعی ساختمان جلوگیری می‌کند. این رفتار نامطلوب ماده تغییر فاز دهنده، به واسطه دور بودن نقطه ذوب آن از محدوده آسایش اتفاق می‌افتد. همان‌طور که مطابق شکل (۱۳) در نقطه ذوب ۲۵ °C این رفتار مشاهده نمی‌شود. بنابراین نقطه ذوب، نقش قابل توجهی در میزان تأثیر گذاری ماده تغییر فاز دهنده دارد.

با بررسی صرفه‌جویی انرژی ماهیانه، فهم بهتری از نقش نقطه ذوب در عملکرد مواد تغییر فاز دهنده به دست می‌آید. به این منظور برای دو ساختمان S و NEWSC، ماده‌ای که در هر ماه موجب بیشترین مقدار صرفه‌جویی انرژی شده است مشخص، و نقطه ذوب آن در شکل (۱۵) نشان داده شده است. با در نظر گرفتن شرایط آب و هوایی مانند دمای هوا و تابش خورشید، ارتباطی یکتا بین این پارامترها و نتایج شکل (۱۵) قابل توصیف نیست.



شکل ۱۵ تأثیر دمای ذوب ماده تغییر فاز دهنده بر مصرف انرژی ماهیانه

اما به طور کلی می‌توان گفت در ماه‌های سرد سال ماده با نقطه ذوب ۲۱ °C، در ماه‌های گرم ماده با نقطه ذوب ۲۳ °C، در ماه‌های خیلی گرم ماده با نقطه ذوب ۲۵ °C و در ماه‌های معتدل ماده با نقاط ذوب ۲۱ و ۲۳ درجه سلسیوس مناسب هستند.

نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی تأثیر مواد تغییر فاز دهنده بر عملکرد حرارتی ساختمان‌های پیش‌ساخته سبک‌وزن پرداخته شده است. به این منظور مصرف انرژی یک ساختمان نمونه در شهر کرمانشاه در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر شبیه‌سازی شده است. از تهویه طبیعی و نفوذ هوا صرف‌نظر شده و تأمین شرایط آسایش توسط یک دستگاه کولر اسپلیت انجام می‌شود. ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده در جهات مختلف ساختمان، در لایه‌های مختلف دیواره و با ضخامت‌های مختلف اجرا شده است. همچنین از مواد با نقاط ذوب مختلفی استفاده شده است. خلاصه نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

مواد تغییر فاز دهنده باعث کاهش مصرف انرژی ساختمان

می‌شوند. در بین جهات اصلی، دیوار جنوبی با ۱۲٫۱٤ درصد کاهش مصرف دارای بیشترین صرفه‌جویی است. در صورت اجرای ماده تغییر فاز دهنده روی تمام پوسته ساختمان، مقدار صرفه‌جویی تا ۳۷٫۲ در صد افزایش می‌یابد. در این حالت، ماده تغییر فاز دهنده در ماه‌های آوریل، می، اکتبر و نوامبر رفتاری آرمانی داشته و تقریباً بدون نیاز به انرژی، دمای ساختمان را در محدوده آسایش تنظیم می‌کند. از دیدگاه اقتصادی دیوار جنوبی با صرفه‌جویی ۲٫۰۸ کیلووات ساعت به ازای هر کیلوگرم از ماده تغییر فاز دهنده، بهترین عملکرد را در بین تمام حالات بررسی شده دارد. از این نظر، اجرای ماده تغییر فاز دهنده روی تمام پوسته خارجی ساختمان اقتصادی نیست.

ماده تغییر فاز دهنده نسبت به عایق حرارتی باید در سمت داخل ساختمان اجرا شود. در غیر این صورت تا ۹۰ در صد از صرفه‌جویی قابل اکتساب از دست می‌رود. هرچند که با افزایش ضخامت ماده تغییر فاز دهنده مقدار مصرف انرژی ساختمان کاهش می‌یابد، اما از نظر اقتصادی ضخامت‌های کمتر مناسب‌تر هستند. به عنوان مثال با افزایش ضخامت از ۵ به ۲۵ میلی‌متر، مقدار صرفه‌جویی انرژی از ۳٫۰۸ کیلووات ساعت در هر کیلوگرم ماده به ۰٫۹۷ کاهش پیدا می‌کند. در هر صورت با افزایش ضخامت به بیش از ۲۰ میلی‌متر، تغییر قابل توجهی در صرفه‌جویی انرژی مشاهده نمی‌شود.

نقطه ذوب باید متناسب با شرایط آب و هوایی انتخاب شود. در صورتی که ماده تغییر فاز دهنده نسبت به عایق حرارتی در سمت داخل ساختمان اجرا شده باشد، بهتر است نقطه ذوب آن در محدوده دمای آسایش باشد. برای شرایط اعمال شده در این پژوهش، بیشترین صرفه‌جویی سالیانه در نقطه ذوب ۲۱ °C به دست آمد.

تقدیر و تشکر

فهرست علائم

C	سقف
E	دیوار شرقی
N	دیوار شمالی
NEWS	هر چهار دیوار ساختمان
NEWSC	هر چهار دیوار به‌علاوه سقف
S	دیوار جنوبی
W	دیوار غربی

واژه نامه

Extreme climate	آب و هوای شدید
Hysteresis	پسماند
Operative Temperature	دمای کارکردی
Pearson correlation coefficient	ضریب همبستگی پیرسون
Phase Change Materials	مواد تغییر فاز دهنده

مراجع

[1] F. Kuznik, J. Virgone, "Experimental assessment of a phase change material for wall building use", *Applied Energy*, vol. 86, no. 10, Pp. 2038-2046, 2009.

[2] M. Li, Z. Wu, and J. Tan, "Heat storage properties of the cement mortar incorporated with composite phase change material", *Applied Energy*, vol. 103, Pp. 393-399, 2013.

[3] B.S. Dehkordi, M. Afrand, "Energy-saving owing to using PCM into buildings: Considering of hot and cold climate region", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 52, Pp. 102-112, 2022.

[4] J. Jia, L. Bo, M. Lingyong, W. Hui, L. Dong, and W. Yiran, "Energy saving performance optimization and regional adaptability of prefabricated buildings with PCM in different climates", *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 26, Pp. 101-164, 2021.

[5] S. Liu, Z. Li, Y. Teng, and L. Dai, "A dynamic simulation study on the sustainability of prefabricated buildings", *Sustainable Cities and Society*,vol. 77, Pp. 103551, 2022.

[6] Q. Shen, Y. Yu., J. Hou, Q. Wang, L. Zhang, and X. Meng, "The Testing Research on Prefabricated Building Indoor Thermal Environment of Earthquake Disaster Region", *Procedia Engineering*, vol. 205, Pp. 453-460, 2017.

[7] Y. Wang, L. Wang, E. Long, and S. Deng, "An experimental study on the indoor thermal environment in prefabricated houses in the subtropics", *Energy and Buildings,* vol. 127, Pp. 529-539, 2016.

[8] D. Tetlow, L. Simon, S. YeeLiew, B. Hewakandamby, D. Mack, W. Thielemans, and S. Riffata, "Cellulosic-crystals as a fumed-silica substitute in vacuum insulated panel technology used in building construction and retrofit applications", *Energy and Buildings,* vol. 156, Pp. 187-196, 2017.

[9] G. Evola, L. Marletta, and F. Sicurella, "A methodology for investigating the effectiveness of PCM wallboards for summer thermal comfort in buildings", *Building and Environment,* vol. 59, Pp. 517-527, 2013.

[10] A.M. Khudhair, M.M. Farid, "A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials", *Energy Conversion and Management,* vol. 45, no. 2, Pp. 263-275, 2004.

[11] Y. Konuklu, M. Ostry, H. Paksoy, and P. Charvat, "Review on using microencapsulated phase change materials (PCM) in building applications", *Energy and Buildings,* vol. 106, Pp. 134-155, 2015.

[12] K. Pielichowska, K. Pielichowski, "Phase change materials for thermal energy storage", *Progress in Materials Science*, vol. 65, Pp. 67-123, 2014.

[13] I. Mandilaras, M. Stamatiadou, D. Katsourinis, G. Zannis, and M. Founti, "Experimental thermal characterization of a Mediterranean residential building with PCM gypsum board walls", *Building and Environment,* vol. 61, Pp. 93-103, 2013.

[14] L. Bianco, V. Serra, S. Fantucci, M. Dutto, and M. Massolino, "Thermal insulating plaster as a solution for refurbishing historic building envelopes: First experimental results", *Energy and Buildings,* vol. 95, Pp. 86-91, 2015.

[15]L.F. Cabeza, C. Castellón, M. nogués, M. Medrano, R. Leppers, and O. Zubillaga, "Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings", *Energy and Buildings*, vol. 39, no. 2, Pp. 113-119, 2007.

[16] C. Barreneche, A. Fernández, M. Niubó, J. Chimenos, F. Espiell, M. Segarra, C. Solé, and L. Cabeza, "Development and characterization of new shape-stabilized phase change material (PCM)-Polymer including electrical arc furnace dust (EAFD), for acoustic and thermal comfort in buildings", *Energy and Buildings,* vol. 61, Pp. 210-214, 2013.

[17] R. Vicente, T. Silva, "Brick masonry walls with PCM macrocapsules: An experimental approach", *Applied Thermal Engineering,* vol. 67, no. 1, Pp. 24-34, 2014.

[18] S.G. Jeong, J. Jeon, J. Seo, J. HunLee, and S. Kim, "Performance evaluation of the microencapsulated PCM for wood-based flooring application", *Energy Conversion and Management*, vol. 64, Pp. 516-521, 2012.

[19] P. Marin, M. Saffari, A. Gracia, X. Zhu, M.M. Farid, L. Cabeza, and S. Ushak, "Energy savings due to the use of PCM for relocatable lightweight buildings passive heating and cooling in different weather conditions", *Energy and Buildings,* vol. 129, Pp. 274-283, 2016.

[20] S. Sonnick, L. Erlbeck, K. Schlachter, J. Strischakov, T. Mai, C. Mayer, K. Jakob, H. Nirschl, and M. Rädle, "Temperature stabilization using salt hydrate storage system to achieve thermal comfort in prefabricated wooden houses", *Energy and Buildings,* vol. 164, Pp. 48-60, 2018.

[21] L. Zhu, Y. Yang, S. Chen, and Y. Sun, "Numerical study on the thermal performance of lightweight temporary building integrated with phase change materials", *Applied Thermal Engineering*, vol. 138, Pp. 35-47, 2018.

[22] A. Fateh, D. Borelli, H. Weinläder, and F. Devia, "Cardinal orientation and melting temperature effects for PCM-enhanced light-walls in different climates", *Sustainable Cities and Society*, vol. 51, Pp. 101766, 2019.

[23] C. Wang, H. Xiao, D. Shiming, L. Enshen, and N. Jianlei, "An experimental study on applying PCMs to disaster-relief prefabricated temporary houses for improving internal thermal environment in summer", *Energy and Buildings*, vol. 179, Pp. 301-310, 2018.

[24] C. Wang, S. Deng, J. Niu, and E. Long, "A numerical study on optimizing the designs of applying PCMs to a disaster-relief prefabricated temporary-house (PTH) to improve its summer daytime indoor thermal environment", *Energy*, vol. 181, Pp. 239-249, 2019.

[25] E. Mohseni, W. Tang, "Parametric analysis and optimisation of energy efficiency of a lightweight building integrated with different configurations and types of PCM", *Renewable Energy*, vol. 168, Pp. 865-877, 2021.

[26] Z.a. Liu, J. Hou, X. Meng, and B.J. Dewancker, "A numerical study on the effect of phase-change material (PCM) parameters on the thermal performance of lightweight building walls", *Case Studies in Construction Materials*, vol. 15, Pp. e00758, 2021.

[27] R.A. Kishore, M.V.A. Bianchi, C. Booten, J. Vidal, and R. Jackson, "Parametric and sensitivity analysis of a PCM-integrated wall for optimal thermal load modulation in lightweight buildings", *Applied Thermal Engineering*, vol. 187, Pp. 116568, 2021.

[28] Available: https://www.ladybug.tools/epwmap. [Accessed Nov. 22, 2021].

[29] P. Schober, C. Boer, and L.A. Schwarte, "Correlation Coefficients: Appropriate Use and Interpretation", *Anesth Analg*, vol. 126, no. 5, Pp. 1763-1768, 2018.